University of Anbar
College of Science
Department of Physics

فيزياء المواد

Physics of Materials

المرحلة الثالثة
الكورس الاول

اعداد
م.د. قيس عبدالله عباس

10. Thermal properties الخواص الحرارية

Thermal property الخاصية الحرارية refersتشير الى to the response استجابة of a material to the application تطبيق of heat حرارة. As a solid absorbs تمتص energy in the form بشكل of heat, its temperature rises تزداد حرارتها, and its dimensions ابعادها increase تزداد. The energy may be transported تنتقل to cooler regionsالاجزاء الباردة of the specimen للعينة if اذا temperature gradients exist التدرج الحراري موجود, and ultimately وبانهاية, the specimen may melt ربما تذوب. Heat capacity السعة الحرارية, thermal expansion التمدد الحراري, and thermal conductivity التوصيلية الحرارية are properties الخصائص of materials.

10.1 Heat Capacity السعة الحرارية

A solid material, when heated عندما تسخن, experiences تعاني an increase زيادة in temperature درجة الحرارة signifying مما يدل على that some energy بعض الطاقة has been absorbed تمتص. Heat capacity is a property هي خاصية that is indicative تدل على of a material's ability قدرة المادة to absorb امتصاص heat from the external surroundings المحيط الخارجي; it represents يمثل the amount مقدار of energy required الطاقة المطلوبة to produce لانتاج a unit temperature rise ازدياد درجة حرارة الوحدة . In mathematical terms, the heat capacity C is expressed as follows:

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

where *dQ* is the energy required to produce a *dT* temperature change. heat capacity is specified per mole of material (e.g., J/mol. K, or cal/mol .K).

10.2 Thermal Expansion التمدد الحراري

Most معظم solid materials expand تتمدد upon heating بالحرارة and contract وتتقلص when cooled بالبرودة. The change التغير in length بالطول with temperature for a solid material may be expressed as follows:

$$\frac{l_f - l_0}{l_0} = \alpha_l (T_f - T_0)$$

or

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_l \Delta T$$

where l_0 and l_f represent, respectively, initial بدائي and final نهائي lengths with the temperature change تغير درجة الحرارة from T_0 to T_f. The parameter المعامل α_l is called the **linear coefficient of thermal expansion المعامل الخطي للتمدد الحراري;** it is a material property خاصية that is indicative تدل على of the extent مدى to which a material expands تتوسع upon heating بالتسخين and has units ولها وحدات of reciprocal مقلوب temperature $^{o}C^{-1}$.

heating or cooling affects تؤثر all the dimensions جميع ابعاد of a body, with مع a resultant change تغير ناتج in volume في الحجم. Volume changes تغيرات الحجم with temperature may be computed تحسب from

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha_v \Delta T$$

where ΔV and V_0 are the volume change التغير بالحجم and the original volume الحجم الاصلي, respectively على التتابع. And α_v symbolizes يرمز الى **the volume coefficient of thermal expansion المعامل الحجمي للتمدد الحراري**.

10.3 Thermal Conductivity التوصيلية الحرارية

Thermal conduction التوصيل الحراري is the phenomenon ظاهرة by which heat is transported تنتقل from high من العالي- to low الى الواطي-temperature regions مناطق الحرارة of a substance المادة. The property الخاصية that characterizes التي تصف the ability مقدرة of a material to transfer لنقل heat الحرارة is the thermal conductivity. It is best defined افضل تعريف in terms of the expression.

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

where q denotes تشير الى the heat flux فيض الحرارة, or heat flow جريان الحرارة, per unit time per unit area, **k** is the thermal conductivity, and *dT/dx* is the temperature gradient التدرج الحراري through the conducting medium الوسط الموصل.

10.4 Mechanisms of Heat Conduction

آليات التوصيل الحراري

Heat is transported تنتقل in solid materials في المادة الصلبة by both بكلا من lattice vibration waves موجات اهتزاز الشبكة (phonon الفونون) and free electrons الالكترونات الحرة. A thermal conductivity is associated ترافق with each مع كل of these mechanisms, and the total conductivity التوصيلية الكلية is the sum جمع of the two contributions التوزيعين, or

$$k = k_l + k_e$$

where k_l and k_e represent the lattice vibration and electron thermal conductivities, respectively.

The thermal energy الطاقة الحرارية associated المرافقة with phonons or lattice waves is transported تنتقل in the direction باتجاه of their motion حركتها. The k_l contribution توزيع results الناتج from a net movement الحركة الصافية of phonons from high- to low temperature regions مناطق of a body across عبر which a temperature gradient التدرج الحراري exists الموجود. Free or conducting electrons participate تشارك in electronic thermal conduction التوصيلية الحرارية الالكترونية.

10.4.1 Metals المعادن

In high-purity metals, the electron mechanism الية الالكترون of heat transport لانتقال الحرارة is much more efficient اكثر كفائة من than the phonon contribution توزيع الفونون because electrons لان الالكترونات are not as easily scattered لاتستطار بسهولة as مثل phonons الفونونات and have higher velocities وتمتلك سرع عالية. Furthermore, زيادة على ذلك metals are extremely good conductors موصلة جيدة of heat للحرارة because relatively نسبيا large numbers اعداد كبيرة of free electrons الالكترونات الحرة exist موجودة that participate والتي تشارك in thermal conduction التوصيل الحراري.The thermal conductivities of several of the common metals are given in Table 10.1; values generally range between about 20 and 400 W/m.K.

10.4.2 Ceramics السيراميك

Non-metallic materials مواد غير معدنية are thermal insulators عوازل حرارية because they lack نقص large numbers اعداد كبيرة of free electrons الالكترونات الحرة. Thus, وبالتالي the phonons are primarily responsible المسؤول الأول for thermal conduction: k_e is much smaller than k_l.

Thermal conductivity values قيم for a number of ceramic materials are contained نحصل عليها in Table 10.1; room-temperature thermal conductivities range between approximately 2 and 50 W/m. K

10.4.3 Polymers البوليمرات

Thermal conductivities for most polymers are on the order of 0.3 W/m.K. For these materials, energy transfer انتقال الطاقة is accomplished ينجز by the vibration الاهتزاز and rotation الدوران of the chain molecules جزيئات السلاسل. The magnitude قيمة of the thermal conductivity depends تعتمد على on the degree درجة of crystallinity التبلور. Polymers are often used as thermal insulators عوازل حرارية because of their low thermal conductivities توصيليتها الحرارية القليلة.

Table 10.1 the thermal properties for a Variety of Materials

Material	c_p $(J/kg\cdot K)^a$	α_l $[(°C)^{-1} \times 10^{-6}]^b$	k $(W/m\cdot K)^c$	L $[\Omega\cdot W/(K)^2 \times 10^{-}$
		Metals		
Aluminum	900	23.6	247	2.20
Copper	386	17.0	398	2.25
Gold	128	14.2	315	2.50
Iron	448	11.8	80	2.71
Nickel	443	13.3	90	2.08
Silver	235	19.7	428	2.13
Tungsten	138	4.5	178	3.20
1025 Steel	486	12.0	51.9	—
316 Stainless steel	502	16.0	15.9	—
Brass (70Cu–30Zn)	375	20.0	120	—
Kovar (54Fe–29Ni–17Co)	460	5.1	17	2.80
Invar (64Fe–36Ni)	500	1.6	10	2.75
Super Invar (63Fe–32Ni–5Co)	500	0.72	10	2.68
		Ceramics		
Alumina (Al_2O_3)	775	7.6	39	—
Magnesia (MgO)	940	13.5^d	37.7	—
Spinel ($MgAl_2O_4$)	790	7.6^d	15.0^e	—
Fused silica (SiO_2)	740	0.4	1.4	—
Soda–lime glass	840	9.0	1.7	—
Borosilicate (Pyrex) glass	850	3.3	1.4	—
		Polymers		
Polyethylene (high density)	1850	106–198	0.46–0.50	—
Polypropylene	1925	145–180	0.12	—
Polystyrene	1170	90–150	0.13	—
Polytetrafluoroethylene (Teflon)	1050	126–216	0.25	—
Phenol-formaldehyde, phenolic	1590–1760	122	0.15	—
Nylon 6,6	1670	144	0.24	—
Polyisoprene	—	220	0.14	—

10.5 Thermal Stresses الاجهادات الحراري

Thermal stresses الاجهادات الحرارية are stresses هي اجهاد induced يتولد in a body في الجسم as a result of نتيجة الى changes تغيرات in temperature في درجة الحرارة. An understanding لفهم of the origins اصل and nature وطبيعة of thermal stresses is important مهمة because these stresses لان هذه الاجهادات can lead يمكن ان تقود الى to fracture الكسر or undesirable plastic deformation تشوه البلاستيك غير مرغوب فيه .

Let us first consider لنعتبر اولا a homogeneous متجانس and isotropic متناظر solid rod اسطوان صلبة that is heated تسخن or cooled او تبرد uniformly بانتظام; that is, no temperature gradients لايوجد تدرج حراري are imposed مسلط. For free expansion التمدد الحر or contraction الانكماش, the rod will be stress free.

The magnitude of the stress σ resulting from a temperature change from T_0 to T_f is

$$\sigma = E\alpha_l(T_0 - T_f) = E\alpha_l \Delta T$$

where E is the modulus معامل of elasticity المرونة and α_l is the linear coefficient المعامل الخطي of thermal expansion التمدد الحراري.

Example 10.1 **Thermal Stress Created upon Heating**

A brass rod is to be used in an application requiring its ends to be held rigid. If the rod is stress free at room temperature [20 °C], what is the maximum temperature to which the rod may be heated without exceeding a compressive stress of 172 MPa , Assume a modulus of elasticity of 100 GPa for brass. the magnitude of the linear coefficient of thermal expansion is 20.0 x 10^{-6} (°C)$^{-1}$.

Solution

To solve this problem, where the stress of 172 MPa is taken to be negative. Also, the initial temperature T_0 is 20 °C, and the magnitude of the linear coefficient of thermal expansion is 20.0 x 10^{-6} (°C)$^{-1}$. Thus, solving for the final temperature T_f yields

$$\sigma = E\alpha_l(T_0 - T_f)$$

$$T_f = T_0 - \frac{\sigma}{E\alpha_l}$$

$$= 20°\text{C} - \frac{-172 \text{ MPa}}{(100 \times 10^3 \text{ MPa})[20 \times 10^{-6} \, (°\text{C})^{-1}]}$$

$$= 20°\text{C} + 86°\text{C} = 106°\text{C}$$

Reference

1- Materials _Science_ and _Engineering_9th .pdf · version 1